

Primljen / Received: 3.2.2015.  
 Ispravljen / Corrected: 19.4.2015.  
 Prihvaćen / Accepted: 2.5.2015.

Dostupno online / Available online: 10.5.2016.

# Ispitivanje krutosti zastorne prizme željezničkog kolosijeka

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Jabbar Ali Zakeri**, dipl.ing.građ.  
 Iransko sveučilište znanosti i tehnologije  
 Teheran, Iran  
[zakeri@iust.ac.ir](mailto:zakeri@iust.ac.ir)



Mr.sc. **Seyed Ali Mosayebi**, dipl.ing.građ.  
 Iransko sveučilište znanosti i tehnologije  
 Teheran, Iran  
[mosayebi@iust.ac.ir](mailto:mosayebi@iust.ac.ir)

Stručni rad

**Jabbar Ali Zakeri, Seyed Ali Mosayebi**

## Ispitivanje krutosti zastorne prizme željezničkog kolosijeka

U radu je analiziran utjecaj onečišćenja zastorne prizme na njezinu krutost. Rezultati ispitivanja pokazali su da se postotak onečišćenja zastora značajno mijenja s obzirom na debljinu zastorne prizme. Zbog toga je zastor tijekom ispitivanja podijeljen u tri sloja, a krutost svakog sloja određena je primjenom modela piramide koji je određen za taj slučaj. Rezultati su pokazali da donji sloj zastorne prizme ima veću krutost u odnosu na površinski i srednji sloj i do 20 %.

### Ključne riječi:

terensko i laboratorijsko ispitivanje, onečišćenje, sitne čestice, krutost zastorne prizme, model piramide

Professional paper

**Jabbar Ali Zakeri, Seyed Ali Mosayebi**

## Study of ballast layer stiffness in railway tracks

In this paper, ballast layer stiffness in railway tracks is investigated. Test results show that the percentage of ballast contamination changes considerably across the ballast layer depth. For this reason, the ballast was divided during modelling into three layers and the stiffness of each layer was derived based on the pyramid model developed for that purpose. The results show that the stiffness exhibited by the bottom ballast layer exceeds by up to 20 % that of the top and middle layers.

### Key words:

field and laboratory tests, contamination, fine particles, ballast layer stiffness, pyramid model

Fachbericht

**Jabbar Ali Zakeri, Seyed Ali Mosayebi**

## Untersuchungen zur Steifigkeit des Bettungskörpers bei Eisenbahngleisen

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Verunreinigungen des Bettungskörpers auf seine Steifigkeit durchgeführt. Die Resultate der Untersuchungen zeigen, dass der Anteil verunreinigten Schotters stark in Abhängigkeit von der Stärke des Schotterbetts variiert. Daher wurde das Schotterbett bei der Modellierung in drei Abschnitte unterteilt, so dass für jeden Teil die Steifigkeit für den entsprechenden Fall mittels des Pyramidenmodells ermittelt werden konnte. Den Resultaten folgend, weist die untere Schicht des Bettungskörpers im Gegensatz zu der mittleren und der oberen Schicht eine bis zu 20 % grössere Steifigkeit auf.

### Schlüsselwörter:

Feld- und Laborversuche, Verunreinigung, kleine Partikel, Schottersteifigkeit, Pyramidenmodell

### 1. Uvod

Zastorna prizma u kolosiječnoj konstrukciji važna je zbog prijenosa naprezanja, stvaranja veće otpornosti na uzdužne i bočne pomake praga, povećanja elastičnosti, uzdužne i bočne stabilnosti kolosijeka, jednostavnog održavanja i popravaka pruge. Stoga je važno da je tucanički zastor otporan i čvrst, otporan na promjenjive vremenske uvjete, da ne apsorbira vodu, otporan na drobljenje uslijed prolaska vlakova, ima odgovarajuću veličinu zrna, ima zadovoljavajuću elastičnost itd. Zbog toga su nužna laboratorijska ispitivanja za kontrolu kvalitete materijala. Znanstvenici Indraratna i Salim [1], Selig i Waters [2], te Lim [3] provodili su istraživanja u tom području. Ukazano je da neki čimbenici uzrokuju smanjenje učinkovitosti tucaničkog zastora na željezničkim prugama. Jedan od važnijih faktora svakako je onečišćenje zastorne prizme. Taj fenomen uzrokuje promjenu elastičnih svojstava, pogoršanje oštećenja vode te povećanje buke i vibracija. Utjecaj ugljene prašine na zastornoj prizmi proučavali su Tutumluer i Dombrow [4]. U pustinjskom području zbog pješćanih oluja i prodiranja pijeska u slojeve tucaničkog zastora, uočeno je zapunjavanje tucanika te su njegova svojstva značajno pogoršana. Zakeri [5] je ispitivao održavanje željezničkih pruga u pustinjskom području. Zaključio je da su u takvom okruženju smanjena elastična svojstva kolosijeka. Zbog toga je Zakeri sa suradnicima [6, 7] proučavao utjecaj onečišćenja tucanika na vibracije uslijed prolaska vlaka. Jedan od značajnih parametara kolosijeka je krutost koja ima velik utjecaj u dinamičkoj analizi kolosiječne konstrukcije. Puzavac i suradnici [8] ispitivali su utjecaj krutosti tračnica na ponašanje kolosiječne konstrukcije. Zhai i suradnici [9] predstavili su konusni model za ispitivanje odnosa vozilo-kolosijek, a isto su proučavali i Zakeri i Xia [10], Ripke i Knothe [11], Oscarsson [12] te Oscarsson i Dahlberg [13]. U njihovima istraživanjima nisu provedena terenska i laboratorijska ispitivanja granulometrijskog sastava po dubini zastorne prizme i određivanje krutosti. U ovom radu provedeno je ispitivanje granulometrijskog sastava tucanika te je određen udio sitnih čestica na temelju terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Za potrebe ispitivanja, tucanički zastor podijeljen je na tri sloja, a krutost svakog sloja određena je primjenom modela piramide.

### 2. Modeliranje zastorne prizme u analizi željezničkog kolosijeka

Gornji ustroj klasične kolosiječne konstrukcije uključuje tračnice, prag i sustav pričvršćenja, a cijela konstrukcija ugrađena je u zastornu prizmu. Zastorna prizma ima jednoliku raspodjelu zrna, čija je uobičajena veličina između 30 i 60 mm. Glavna uloga zastorne prizme je:

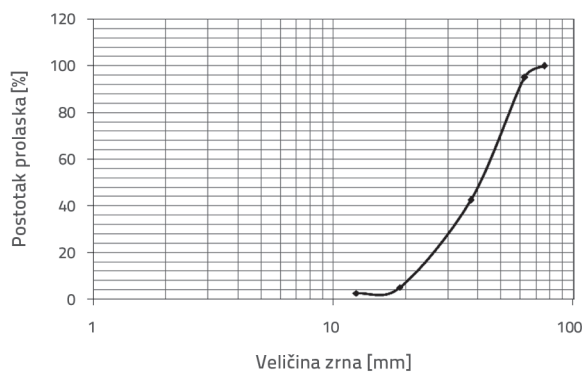
- a) prijenos vertikalnih, horizontalnih i bočnih sila na donje slojeve
- b) osiguravanje pravilnog položaja kolosijeka
- c) omogućavanje elastičnosti tračnica i apsorpiranje energije
- d) odvodnja površinske vode
- e) ugradnja i položaj kolosijeka

- f) prigušenje i amortizacija vibracija i buke zbog prolaska vlakova
- g) izolator donjih slojeva materijala,
- h) sprječava rast korova na pruzi.

Faktori koji imaju različite utjecaje na svojstva tucaničkih slojeva su:

- a) prometno opterećenje
- b) degradacija u tamponskom sloju
- c) onečišćenje zastorne prizme
- d) rast korova ili klimatski (okolišni) uvjeti poput smrzavanja
- e) promjene temperature i drugi utjecaji [1, 2].

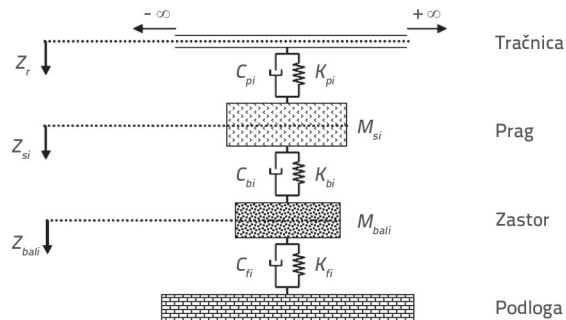
Minimalna debljina zastorne prizme ispod praga je 30 cm, a uobičajeni osni razmak pragova je 60 cm. Na kolosijecima za velike brzine preporučena minimalna debljina zastorne prizme iznosi 40 cm. Debljina tucaničkog sloja treba iznositi najmanje 45 cm kako bi se osigurala otpornost na bočne pomake. Standardne specifikacije elemenata željezničke pruge nalaze se u smjernicama br. 301 [14]. Granulometrijski sastav tucanika prema smjernicama prikazan je na slici 1.



Slika 1. Granulometrijski sastav tucanika prema smjernicama br. 301

Za provođenje dinamičke analize kolosiječne konstrukcije mogu se primijeniti različiti modeli. Numerički modeli željezničkih kolosijeka mogu se podijeliti u tri kategorije s obzirom na raspodjelu masa ispod tračnica:

- a) koncentrirane mase
- b) kontinuirano oslonjena greda
- c) greda na elastičnim diskretnim ležajevima.



Slika 2. Kolosiječna konstrukcija sa zastornu prizmom (tri elementa)

Kako bi se odredio utjecaj zastorne prizme u analizi kolosiječne konstrukcije, zastorna prizma se promatra kao sustav masa i opruga ispod pragova. Zastorne prizma se može podijeliti na jedan, dva ili tri sloja, pri čemu se svaki sloj u dinamičkoj analizi kolosiječne konstrukcije modelira kao koncentrirana masa. Slika 2. prikazuje klasičnu kolosiječnu konstrukciju s tucaničkim zastorom sastavljenom od tri komponente (sloja), a to su tračnice, prag i zastorna prizma.

Budući da se raspodjela onečišćenog materijala i sitnih čestica mijenja s visinom sloja zastornog materijala, model zastorne prizme s tri sloja daje točnije rezultate pri dinamičkoj analizi kolosijeka, u usporedbi s modelom u kojemu zastornu prizmu čini samo jedan sloj. Kroz terenska i laboratorijska ispitivanja analizirana je raspodjela tucaničkog materijala po visini zastorne prizme.

### 3. Laboratorijska i terenska ispitivanja raspodjele čestica tucaničkog zastora

Udio sitnih čestica i udio onečišćenja zastorne prizme povećava se s prolaskom vlakova. Uzroci onečišćenja tucanika dijele se u sljedećih pet kategorija:

- usitnjavanje tucanika zbog naprezanja uslijed toplinskog djelovanja, smrzavanja i odmrzavanja, klimatskih uvjeta i željezničkog prometa
- prodiranje sitnih čestica u tucanički sloj, primjerice atmosferske prašine u zastorni sloj
- degradacije pragova
- prodiranje čestica iz nižih slojeva u zastornu prizmu
- prodiranje čestica kroz gornji ustroj.

Neke od metoda procjene onečišćenja zastora su metoda izotopa, mjerni uređaj, vizualna provjera, uzorkovanje tucanika [1, 2]. Za potrebe terenskih i laboratorijskih ispitivanja raspodjele tucanika po debljini zastorne prizme odabrana je željeznička pruga u Iranu (slika 3.). Karakteristike ispitivane željezničke pruge jesu: tračnice 60 E1, betonski pragovi B70, pričvrсни pribor Vossloh SKL 14, starost pruge je 25 godina, godišnje opterećenje pruge je 5 milijuna bruto, klima je umjerena, maksimalna dopuštena brzina vlakova je 120 km/h, osovinsko opterećenje je 200 kN, a pruga je namijenjena teretnom i putničkom prijevozu.

Uzorkovanje tucaničkog materijala obavljeno je na pet mjernih mjesta koja su nazvana A, B, C, D i F, a postavljena su na

odgovarajućim udaljenostima jedna od drugih. Uzorci tucaničkog materijala potom su ispitivani u laboratoriju.



Slika 3. Željeznički kolosijek s tucaničkom zastornom prizmom

Nakon brojnih ispitivanja uređaja, metoda i uzoraka, odabran je limeni cilindar debljine 2 mm, visine 60 cm i promjera 27 cm. Odabran je takav cilindar jer se ne iskrivljuje i ne deformira, te kako bi se spriječilo drobljenje tucanika. Cilindar je podijeljen na tri jednaka dijela visine 15 cm. Dijelovi su međusobno odvojeni metalnim pocinčanim limovima.

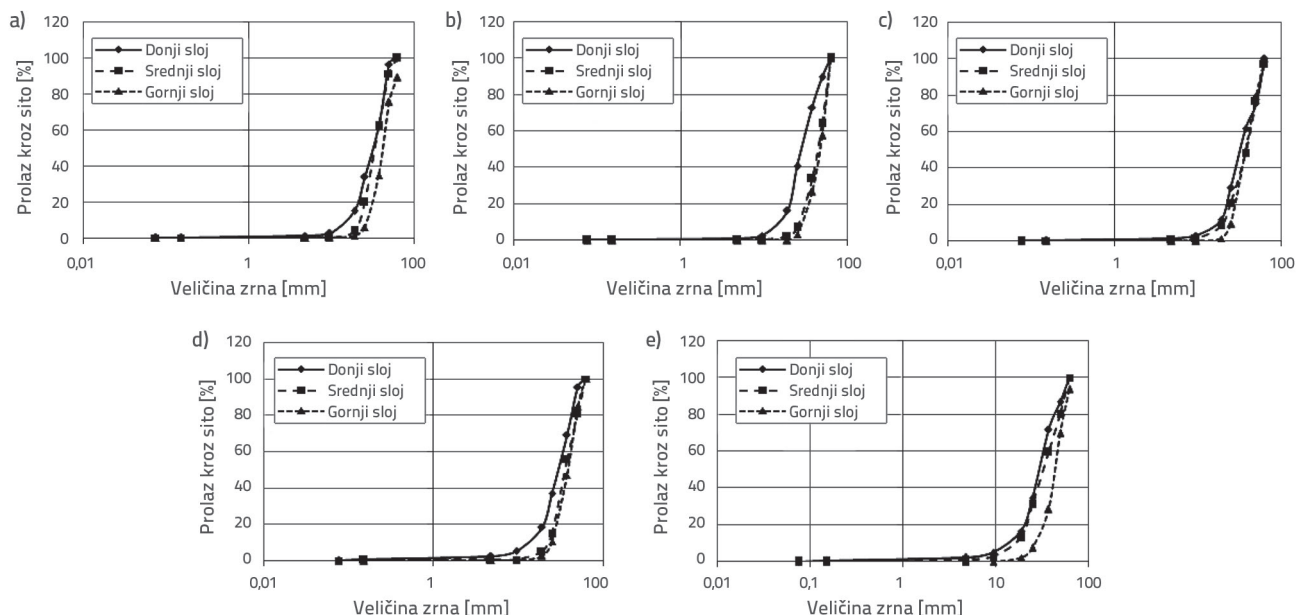
U limenom cilindru prikupljeni su uzorci tucanika za ispitivanje granulometrijskog sastava. Slike 4. i 5. prikazuju cilindar i uzorke iz gornjeg, srednjeg i donjeg sloja tucaničkog zastora.



Slika 4. Metalni cilindar za uzorkovanje



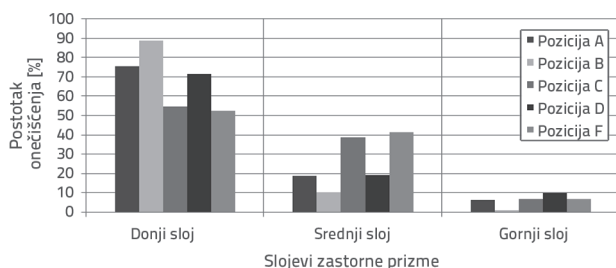
Slika 5. Uzimanje uzoraka tucanika iz različitih slojeva: a) uzorak iz gornjeg sloja; b) uzorak iz srednjeg sloja; c) uzorak iz donjeg sloja



Slika 6. Postotak prolaska kroz sito materijala s različitih mjernih mjesta na temelju terenskih i laboratorijskih ispitivanja: a) mjerno mjesto A; b) mjerno mjesto B; c) mjerno mjesto C; d) mjerno mjesto D; e) mjerno mjesto F

Uzorci su prije ispitivanja sušeni u peći, a potom su prosijani kroz sita različitih otvora. Nakon prosijavanja, određen je postotak materijala koji je ostao na situ i onaj koji je prošao kroz otvor sita. Rezultati sastava tucanika iz gornjeg, srednjeg i donjeg sloja zastora prikazani su na slici 6.

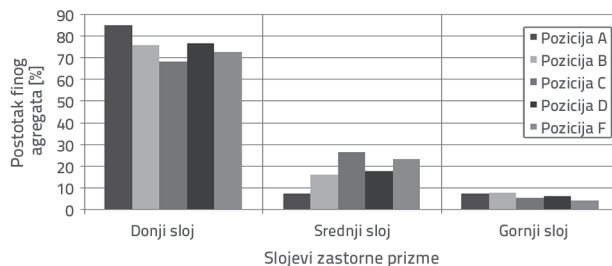
Tucanik iz donjeg sloja zastora ima veći postotak prolaska kroz sito u odnosu na materijal iz srednjeg i gornjeg sloja. Materijal iz srednjeg sloja ima veći postotak prolaska kroz sito nego materijal u gornjem sloju. Za potrebe ispitivanja onečišćenja u dubljim slojevima tucanika primijenjeno je sito br. 3/4, kod kojega je promjer otvora sita 19 mm. Udio onečišćenja u svakom sloju zastorne prizme u svakoj od mjernih točaka (pozicija), prikazan je na slici 7.



Slika 7. Postotak onečišćenja svakog sloja zastorne prizme u različitim mjernim točkama (pozicijama)

Kao što se vidi na slici 7., postotak onečišćenja donjeg sloja u svim mjernim točkama je veći nego u srednjem i gornjem sloju tucanika. Prosječno onečišćenje donjeg sloja tucanika je 68 %, srednjeg sloja 26 % te gornjeg sloja tucanika 6 %. Pomoću postotaka prolaska kroz sito br. 4, kod kojega je promjer otvora 4.75 mm, određuje se udio sitnih čestica po

dubini slojeva zastora. Postotak sitnog agregata za svaki sloj zastora u svakoj mjernoj točki prikazan je na slici 8.



Slika 8. Udio sitnih čestica u svakom sloju zastorne prizme u različitim mjernim točkama (pozicijama)

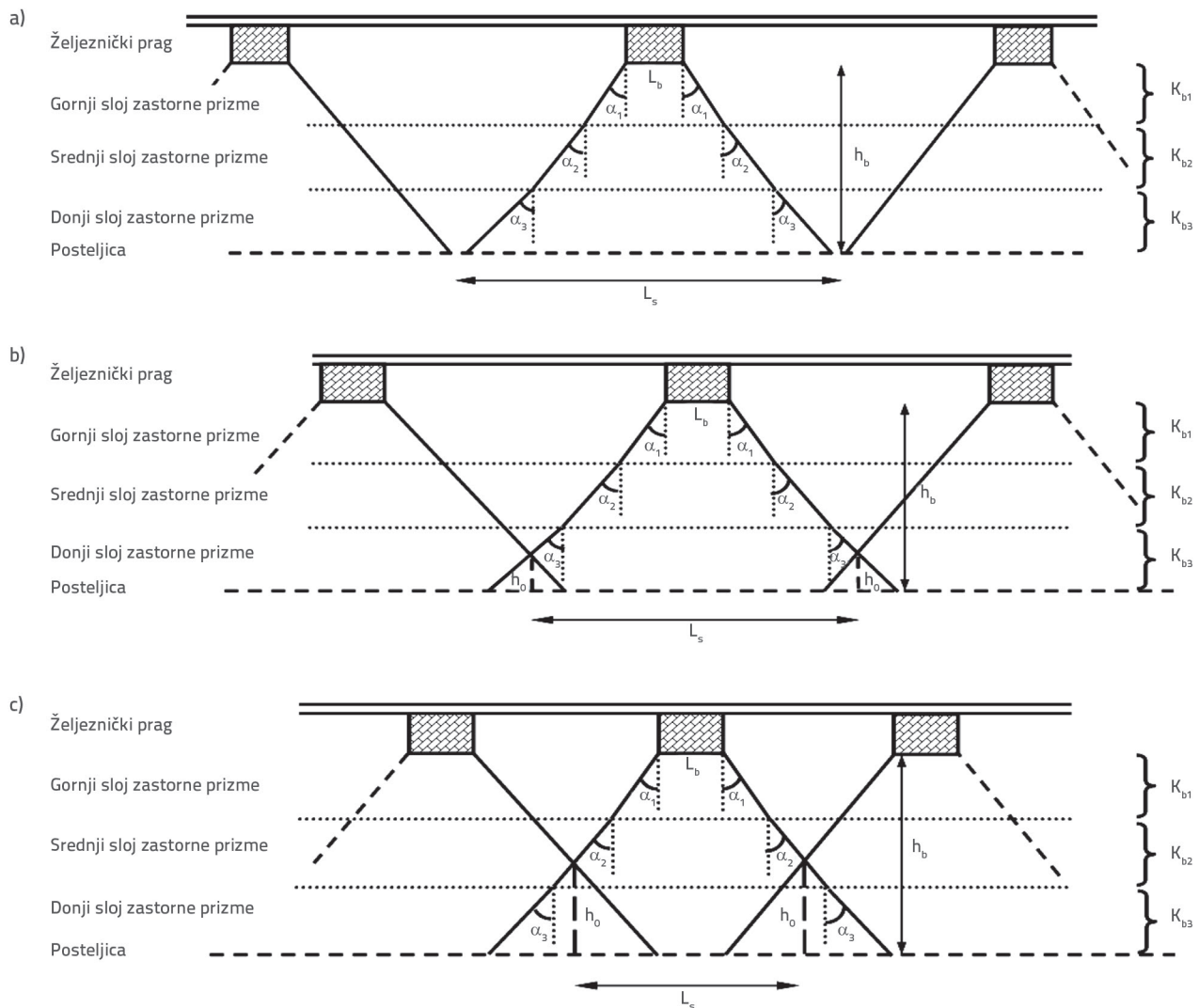
Udio sitnih čestica u donjem sloju u svim mjernim točkama veći je nego u srednjem i gornjem sloju zastora. Prosječni udio sitnih čestica u donjem sloju tucanika iznosi 76 %, u srednjem 18 %, a u gornjem 6 %. Zbog velike razlike u onečišćenju tucanika i udjelu sitnih čestica s obzirom na sloj zastorne prizme, ispitivanje je provedeno za svaki sloj zasebno, čime su dobiveni pouzdaniji rezultati utjecaja zastorne prizme pri analizi željezničkog kolosijeka.

Krutost pojedinog sloja tucanika određena je u sljedećem poglavlju primjenom razvijenih modela piramide.

#### 4. Određivanje krutosti zastorne prizme primjenom modela piramide

Za potrebe dinamičke analize željezničke pruge, zastorna prizma je modelirana kao niz opruga i prigušivača postavljenih ispod pragova. Prijenos opterećenja s praga na zastornu prizmu približno se podudara s konusnom distribucijom.





Slika 9. Tucanički zastor podijeljen u tri sloja: a) zastorna prizma bez preklapanja naprezanja; b) zastorna prizma s preklapanjem naprezanja u donjem sloju; c) zastorna prizma s preklapanjem naprezanja u srednjem sloju

To znači da su naprezanja u zastornoj prizmi jednoliko raspodijeljena oko konusnog područja, a izvan tog područja naprezanja su jednaka nuli. Nagib izvodnice stošca predstavlja kut rasprostiranja naprezanja u slojevima zastorne prizme. Stoga se krutost tučaničkog sloja ispod pragova može odrediti primjenom modela piramide [9].

Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, na osnovi ispitivanja provedenih na terenu i u laboratoriju, zaključeno je da se udio sitnog agregata i onečišćenje zastorne prizme povećava u dubljim slojevima kolosiječnog zastora. Zbog toga je zastor pri modeliranju podijeljen u tri sloja, a krutost je određena za svaki sloj posebno, primjenom modela piramide. Slika 9. prikazuje zastornu prizmu podijeljenu u tri sloja. Postoje tri slučaja preklapanja naprezanja u slojevima tučanika:

- a) zastorna prizma bez preklapanja naprezanja,
- b) zastorna prizma s preklapanjem naprezanja u donjem sloju,
- c) zastorna prizma s preklapanjem naprezanja u srednjem sloju.

Oznaka  $L_s$  predstavlja udaljenost pragova,  $L_b$  širinu praga, a  $h_b$  debljinu tučaničkog sloja. Oznake  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  i  $\alpha_3$  predstavljaju kutove rasprostiranja naprezanja u gornjem, srednjem i donjem sloju zastorne prizme. Kada su kotači tračničkog vozila postavljeni između pragova, u oba susjedna oslonca formira se naprezanje u obliku piramide. Povećanjem debljine tučaničkog sloja ili udjela sitnog agregata, povećava se i kut rasprostiranja naprezanja, čime se povećava vjerojatnost preklapanja naprezanja između susjednih slojeva, osobito u nižim slojevima. Kut rasprostiranja naprezanja varira između  $25^\circ$  i  $37^\circ$ , a povećava se s povećanjem debljine zastornog sloja [15]. Prije određivanja krutosti tučaničkog zastora primjenom razvijenog modela piramide, treba ispitati položaj i vrijednost naprezanja koje se preklapa u slojevima zastora. Općenito, postoje tri područja (na gornjem, srednjem i donjem sloju zastora). Važno je napomenuti da se krutost svakog sloja zastorne prizme u kojem dolazi do preklapanja naprezanja određuje kao

Tablica 1. Krutost pojedinog sloja zastorne prizme za slučaj bez preklapanja naprezanja

Slojevi zastorne prizme	Proračun krutosti
Gornji sloj	$K_1 = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_1}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b}\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1}{l_e + 2h_1tg\alpha_1}\right)}{\right]} E_1$
Srednji sloj	$K_2 = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_2}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b} + 2h_1tg\alpha_1\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2}\right)}{\right]} E_2$
Donji sloj	$K_3 = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_3}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b} + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2 + 2h_3tg\alpha_3}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2 + 2h_3tg\alpha_3}\right)}{\right]} E_3$

Tablica 2. Izračun krutosti za svaki sloj zastorne prizme za slučaj preklapanja naprezanja u donjem sloju

Slojevi zastorne prizme	Proračun krutosti	
Gornji sloj	$K_1 = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_1}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b}\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1}{l_e + 2h_1tg\alpha_1}\right)}{\right]} E_1$	
Srednji sloj	$K_2 = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_2}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b} + 2h_1tg\alpha_1\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2}\right)}{\right]} E_2$	
Donji sloj	Bez preklapanja	$K_{31} = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_3}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b} + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2 + 2h_3tg\alpha_3}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2 + 2h_3tg\alpha_3}\right)}{\right]} E_3$
	S preklapanjem	$K_{32} = \frac{2l_s tg\alpha_3}{\ln\left[1 + \frac{2h_{32}tg\alpha_3}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_2tg\alpha_2 + 2h_3tg\alpha_3}\right]} E_3$

Table 3. Izračun krutosti za svaki sloj zastorne prizme s preklapanjem naprezanja u srednjem sloju

Slojevi zastorne prizme	Proračun krutosti	
Gornji sloj	$K_1 = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_1}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b}\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1}{l_e + 2h_1tg\alpha_1}\right)}{\right]} E_1$	
Srednji sloj	Bez preklapanja	$K_{21} = \frac{2(l_e - l_b)tg\alpha_2}{\ln\left[\frac{\left(\frac{l_e}{l_b} + 2h_1tg\alpha_1\right)\left(\frac{l_b + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_{21}tg\alpha_2}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_{21}tg\alpha_2}\right)}{\right]} E_2$
	S preklapanjem	$K_{22} = \frac{2l_s tg\alpha_2}{\ln\left[1 + \frac{2h_{22}tg\alpha_2}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_{21}tg\alpha_2}\right]} E_2$
Donji sloj	$K_3 = \frac{2l_s tg\alpha_3}{\ln\left[1 + \frac{2h_3tg\alpha_3}{l_e + 2h_1tg\alpha_1 + 2h_{21}tg\alpha_2 + 2h_{22}tg\alpha_2}\right]} E_3$	

Tablica 4. Omjer krutosti za zastornu prizmu debljine 30 cm

Slučajevi	1			2			3			4		
Slojevi zastorne prizme	gornji	srednji	donji	gornji	srednji	donji	gornji	srednji	donji	gornji	srednji	gonji
Kut rasprostiranja naprezanja [°]	25	31	37	28	34	40	31	37	43	34	40	46
Preklapajući sloj	donji sloj			donji sloj			donji sloj			donji sloj		
Širina preklapanja [cm]	2,5			5			7			9		
$K_2/K_1$	1,25			1,3			1,35			1,41		
$K_3/K_1$	1,5			1,57			1,62			1,65		

Tablica 5. Omjer krutosti za zastornu prizmu debljine 45 cm

Slučajevi	1			2			3			4		
Slojevi zastorne prizme	gornji	srednji	donji	gornji	srednji	donji	gornji	srednji	donji	gornji	srednji	donji
Kut rasprostiranja naprezanja [°]	25	31	37	28	34	40	31	37	43	34	40	46
Preklapajući sloj	donji sloj			srednji sloj			srednji sloj			srednji sloj		
Širina preklapanja [cm]	14,5			17,6			20,3			22,6		
$K_2/K_1$	1,44			1,5			1,56			1,6		
$K_3/K_1$	1,67			1,68			1,7			1,7		

kombinacija presjeka u kojima dolazi do preklapanja i onih u kojima ne dolazi do preklapanja naprezanja.

Prema danim objašnjenjima, krutost gornjeg, srednjeg i donjeg sloja zastorne prizme određena je primjenom modela piramide koji je izrađen za tri različita slučaja: bez preklapanja naprezanja, s preklapanjem u donjem sloju i s preklapanjem u srednjem sloju zastorne prizme. U tablicama 1., 2. i 3. nalaze se jednadžbe krutosti i njene vrijednosti za svaki sloj, za sva tri slučaja.

U tablicama oznake  $L_e$  predstavljaju sudjelujuću širinu oslonca polovine praga, a  $L_b$  širinu praga. Oznake  $h_1$ ,  $h_2$  i  $h_3$  su debljine gornjeg, srednjeg i donjeg sloja zastorne prizme, dok su  $E_1$ ,  $E_2$  i  $E_3$  pripadajući moduli elastičnosti. Tablica 4. prikazuje omjer krutosti slojeva zastorne prizme debljine 30 cm s različitim kutovima rasprostiranja opterećenja. U tablici su dani i položaji i širine preklapanja naprezanja.

Kao što se može vidjeti u tablici 4., za sloj zastorne prizme debljine 30 cm, širina preklapanja naprezanja povećava se s većim kutom rasprostiranja. Preklapanje naprezanja pojavljuje se također u donjem sloju tucaničkog zastora u svim slučajevima. Omjer krutosti srednjeg i gornjeg sloja te donjeg i gornjeg sloja povećava se s povećanjem kuta rasprostiranja naprezanja. U tablici 5. prikazani su omjeri krutosti slojeva tucanika, položaj i širina preklapajućeg sloja za različite kutove rasprostiranja naprezanja za zastornu prizmu debljine 45 cm.

Kao što se može vidjeti u tablici 5., za zastor debljine 45 cm, širina preklapanja povećava se s povećanjem kuta rasprostiranja naprezanja. Također, povećanjem kuta

rasprostiranja, područje preklapanja pomiče se prema srednjem sloju. Omjer krutosti srednjeg i gornjeg sloja, kao i omjer krutosti donjeg i gornjeg sloja povećava se s povećanjem kuta rasprostiranja naprezanja.

## 5. Zaključak

Tucanički zastor jedan je od najvažnijih dijelova željezničkog kolosijeka, stoga se treba detaljno ispitivati i kontrolirati. Onečišćenje zastorne prizme i prisutnost sitnih čestica u zastoru može utjecati na njegovu učinkovitost, stoga je nužno ispitati granulometrijski sastav tucanika laboratorijskim i terenskim mjerjenjima. U ovom radu provedeno je ispitivanje granulometrijskog sastava uzoraka tucanika s pet različitih mjernih mjesta na željezničkoj pruzi u Iranu. Kao što je vidljivo, ispitivan je materijal između pragova. Izračunani su udjeli sitnih čestica te onečišćenje zastora za svaki uzorak. Zastorna prizma analizirana je kroz tri sloja te je krutost pojedinih slojeva određena primjenom izrađenog modela piramide. Zaključci ispitivanja su sljedeći:

1. Udio sitnog agregata i onečišćenje zastorne prizme u donjem sloju tucaničkog zastora veće je nego u srednjem i gornjem sloju.
2. Prosječno onečišćenje zastorne prizme u donjem sloju iznosi 68 %, u srednjem sloju 26 %, a u gornjem sloju 6 %.
3. Udio sitnih čestica u donjem sloju zastorne prizme iznosi 76 %, u srednjem sloju je 18 %, dok u gornjem sloju iznosi 6 %.

4. Krutost donjeg sloja zastorne prizme je, prema određenom modelu piramide, veća nego u srednjem i gornjem sloju. Prosječni omjer krutosti donjeg i gornjeg sloja zastora je 20 % veći nego omjer krutosti srednjeg i gornjeg sloja zastora debljine 30 cm, odnosno 11 % veći nego u zastoru debljine 45 cm.
5. Povećanjem kuta rasprostiranja naprezanja u slojevima zastora, povećava se i krutost zastora, kod svih debljina zastorne prizme.
6. Omjer krutosti srednjeg i gornjeg sloja zastorne prizme debljine 45 cm je 15,2 %, 15,4 %, 15,5 %, te 13,5 % veća u odnosu na zastor debljine 30 cm.
7. Povećanjem kuta rasprostiranja naprezanja u zastornoj prizmi povećava se i širina preklapanja naprezanja.
8. Omjer krutosti donjeg i gornjeg zastornog sloja kod zastora debljine 45 cm veći je za 11,3 %, 7,5 % i 3 % u odnosu na slojeve zastora čija je debljina 30 cm.
9. Za ispitivanje utjecaja zastorne prizme u analizi željezničkog kolosijeka primjenjuje se model zastorne prizme podijeljene na tri sloja jer je na taj način moguće dobiti rezultate koji točnije prikazuju ponašanje zastorne prizme. Na taj način u obzir se uzimaju značajne razlike u pojedinim slojevima s obzirom na onečišćenje, udio sitnog agregata i krutost tucaničkog zastora.

## LITERATURA

- [1] Indraratna, B., Salim, W.: *Mechanics of Ballasted Rail Tracks, A Geotechnical Perspective*, London: Taylor & Francis/Balkema, 2005.
- [2] Selig, E.T., Waters, J.M.: *Track Geotechnology and Substructure Management*, London: Thomas Telford, 1994.
- [3] Lim, W.L.: *Mechanics of railway ballast behavior*, University of Nottingham, degree of Doctor of Philosophy, 2004.
- [4] Tutumluer, E., Dombrow, W., Huang, H.: Effect of coal dust on railroad ballast strength and stability, *8<sup>th</sup> International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, The University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2009.
- [5] Zakeri, J.A.: Investigation on Railway Track Maintenance in sandy-dry Areas, *Journal of structure and infrastructure engineering*, 8 (2012) 2, pp. 135-140, <http://dx.doi.org/10.1080/15732470903384921>
- [6] Zakeri, J.A., Abbasi, R.: Field investigation on distribution of contact pressure between sleeper and saturated ballast with flowing sand, *11<sup>th</sup> International conference on Railway Engineering*, London, Uk, 2011.
- [7] Zakeri, J.A., Esmaeili, M., Mosayebi, S.A., Abbasi, R.: Effects of vibration in desert area caused by moving trains, *Journal of Modern Transportation*, 20 (2012) 1, pp. 16-23, <http://dx.doi.org/10.1007/BF03325772>
- [8] Puzavac, L., Popovic, Z., Lazarevic, L.: Influence of Track Stiffness on Track behavior under Vertical Load, *Traffic&Transportation*, 24 (2012) 5, pp. 405-412, <http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v24i5.1176>
- [9] Zhai, W.M., Wang, K.Y., Lin, J.H.: Modelling and Experiment of Railway Ballast Vibrations, *Journal of Sound and Vibration*, 270 (2004) 4-5, pp. 673-683, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00186-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00186-X).
- [10] Zakeri, J.A., Xia, H.: Sensitivity Analysis of Track Parameters on Train-Track Dynamic Interaction, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22 (2008) 7, pp. 1299-1304, <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-008-0316-x>
- [11] Ripke, B., Knothe, K.: Simulation of High Frequency Vehicle-Track Interactions, *Vehicle System Dynamics*, Supplement, 24 (1995), pp. 72-85, <http://dx.doi.org/10.1080/00423119508969616>
- [12] Oscarsson, J.: *Dynamic Train / Track / Ballast Interaction – linear and State – Dependent Track Models*, Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 1999.
- [13] Oscarsson, J., Dahlberg, T.: Dynamic Train / Track / Ballast Interaction – Computer Models and Full-Scale Experiments, *Vehicle System Dynamics*, Supplement 28 (1998), pp. 73-84, <http://dx.doi.org/10.1080/00423119808969553>
- [14] Technical and general specification of Ballasted Railway, Leaflet No 301, Management and planning organization of Iran, 2002.
- [15] Ahlbeck, D.R., Meacham, H.C., Prause, R.H.: The development of analytical models for railroad track dynamics, *Railroad Track Mechanics & Technology* (ed. Kerr, A.D.), Pergamon Press, Oxford, 1978.